第44卷 第6期
2019年6月

地球科学 Earth Science
http://www.earth-science.net

Vol. 44 No. 6
Jun. 2019

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.362

多尺度综合地球物理方法在扎西康铅锌锑金多金属矿找矿预测中的应用

郭 镜[1,2],李文昌[2*],李光明[2],焦彦杰[2],梁生贤[2]

1. 成都理工大学地球科学学院,四川成都 610059
2. 中国地质调查局成都地质调查中心,四川成都 610081

摘 要: 青藏高原后碰撞阶段发生了大规模地壳尺度的伸展作用,并在特提斯喜马拉雅带内发育了淡色花岗岩、南北及东西向断裂等构造-热事件,形成了一系列的铅锌锑金多金属矿床.扎西康铅锌锑金多金属矿是带内已发现唯一的超大型多金属矿床.应用多尺度的综合地球物理方法开展扎西康矿区的找矿预测,为特提斯喜马拉雅铅锌锑金成矿带内的矿床勘查提供借鉴.首先,通过穿越错那洞穹窿、藏南拆离系(STDS)及扎西康典型矿床的南北向MT剖面(长72 km,基准点距1 km),初步建立了扎西康矿床深部构造-热事件的空间关系,结合区域构造-热事件的时间关系,提出了构造-热耦合成矿作用模型,为扎西康的地球物理勘探提供基础.其次,通过1∶5万区域重力(线距500 m,点距400 m)和MT剖面(点距500 m)浅部信息的联合解译,对扎西康整装勘查区尺度的导矿构造开展研究.最终,通过激电中梯扫面测量(线距100 m,点距40 m)、AMT剖面(点距50 m)及重力剖面(点距20 m)的联合解译,对扎西康的含矿断裂开展研究,定位深部隐伏矿体.

关键词: 后碰撞伸展期;特提斯喜马拉雅成矿带;构造-热耦合成矿模式;部分熔融体;藏南拆离系;淡色花岗岩;地球物理.

中图分类号: P611 **文章编号:** 1000-2383(2019)06-2129-14 **收稿日期:** 2018-07-06

Application of Multi-Scale Integrated Geophysical Method in Prospecting Prediction of Zhaxikang Pb-Zn-Sb-Au Polymetallic Deposit

Guo Jing[1,2], Li Wenchang[2*], Li Guangming[2], Jiao Yanjie[2], Liang Shengxian[2]

1. *School of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059, *China*
2. *Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu* 610081, *China*

Abstract: A crustal scale extension occurred in the post-collisional stage of the Tibetan Plateau, and tectonic-thermal events closely related to stretching, such as leucogranites, north-south and east-west faults, were developed in the Tethyan Himalayan and developed series of Pb-Zn-Sb-Au polymetallic deposits. The Zhaxikang Pb-Zn-Sb-Au polymetallic deposit is the only super-large polymetallic deposit in the belt. This paper applies a multi-scale integrated geophysical method to Zhaxikang′s prospecting prediction and can provide reference for the exploration of deposits in the Tethys Himalayan Pb-Zn-Sb-Au metallogenic belt. Firstly, the spatial relationship of tectonic-thermal events was initially established by the north-south MT section (72 km long and 1 km from the reference point) crossing the Cuonadong dome and the South Tibet detachment system (STDS). Combined with the time relationship of regional tectonic-thermal events, a possible tectonic-thermal coupling mineralization was proposed, which provides a basis for the geophysical exploration of Zhaxikang. Secondly, through the joint interpretation of 400 km^2, 1∶50 000

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(No.41604118);国家重点研发计划深地资源开采项目(No.2016YFC0600308);中国地质调查局地质调查项目(No.DD20160015).

作者简介: 郭镜(1985-),工程师,勘探地球物理专业.ORCID:0000-0001-8442-8618.E-mail:313756811@qq.com
***通讯作者:** 李文昌(1962-),教授,博士生导师.E-mail:lwcyndd@163.com

引用格式: 郭镜,李文昌,李光明,等,2019.多尺度综合地球物理方法在扎西康铅锌锑金多金属矿找矿预测中的应用.地球科学,44(6):2129-2142.

regional gravity (line distance 500 m, dot distance 400 m) and MT(dot distance 400 m) shallow information, the fault system of the Zhaxiang assembly area was established. Finally, the Zhaxikang polymetallic ore body was delineated by the joint interpretation of the 9 km^2 IP measurement (line distance 100 m, dot distance 40 m) and the AMT profile(dot distance 50 m) and gravity(dot distance 20 m).

Key words: post-collisional extension period of Tibetan Plateau; Tethyan Himalaya metallogenic belt; tectonic-thermal coupled metallogenic model; partial melting; South Tibet detachment system; leucogranites; geophysics.

青藏高原的总体格架形成于65～55 Ma的印度－欧亚陆陆碰撞(Beck *et al.*,1995;Searle *et al.*,1999).碰撞过程大致划分主碰撞(65～41 Ma)、晚碰撞(40～26 Ma)和后碰撞(＜25 Ma)3个阶段,分别对应碰撞汇聚成矿、构造转换成矿和伸展拆离成矿3种成矿过程(侯增谦等,2006a,2006b,2006c),在异常热能驱动机制和构造应力机制下产生了不同的矿床类型(侯增谦,2010).

在后碰撞阶段,总体上青藏高原地壳应力以伸展为特征(侯增谦等,2006c).位于藏南拆离系和雅鲁藏布江缝合带之间的特提斯喜马拉雅地块(Yin and Harrison,2000),在25 Ma以来发育了一系列的构造－热事件,如侵位于特提斯喜马拉雅片麻岩穹窿带的淡色花岗岩(Searle *et al.*,1997),南北向及东西向伸展断裂(Burg *et al.*,1984;Hodges *et al.*,1992;Hodges,2000)(图1)等.这一系列构造－热事件发育过程中,特提斯喜马拉雅形成了一系列的铅锌锑金多金属矿床(侯增谦等,2006c).如沙拉岗锑矿床、得龙锑矿床、马扎拉金锑矿床、哲古锑金矿床、壤拉锑矿床、车穷卓布锑矿床、查拉普金矿床、吉松铅锌矿床、扎西康铅锌锑金多金属矿床等,成矿年龄为12～25 Ma(郑有业等,2007,2014;孟祥金等,2008;张建芳,2010)(图1a).

地球物理方法作为探测地球深部目标地质体空间关系的有效手段,在扎西康典型矿床开展了地球物理方法试验(焦彦杰等,2015,2017),取得了良好效果.但是,如何利用多尺度的综合地球物理方法,从建立矿集区深部构造－热事件的空间关系出发,逐步缩小靶区,最终定位矿体,依然是一个值得探讨的课题.本文实施了一条穿越错那洞穹窿和藏南拆离系的南北向精细大地电磁测深(MT)剖面(长72 km,基准点距1 km),初步建立起扎西康矿集区深部构造－热事件的空间关系,并结合构造－热事件的时间关系,认为部分熔融体驱动含矿热液在断裂系统中运移成矿,是特提斯喜马拉雅铅锌锑金成矿带一种重要的成矿模式.在此基础上,结合断裂系统中含矿热液以分层级的断裂网络从地壳深部流体源向浅部排泄区迁移就位的过程,通过多尺度多方法的地球物理勘探,逐步缩小靶区,成功定位了扎西康铅锌锑多金属矿深部矿体,为区带内的矿床勘查提供借鉴和指示.

1 地质背景

喜马拉雅地体介于雅鲁藏布江缝合带(IYS)与主边界断层(MCT)之间(Yin and Harrison,2000;尹安,2001),是青藏高原最南侧的构造块体(许志琴等,1999).喜马拉雅地体被三条近东西向的深大断裂藏南拆离系(STDS)、主中央逆冲断层(MCT)、主边界逆冲断层(MBT)分隔为三个微地块(特提斯喜马拉雅地块、高喜马拉雅地块、低喜马拉雅地块)(Yin and Harrison,2000;尹安,2001).青藏高原后碰撞伸展阶段在藏南形成了大型拆离断层系——藏南拆离系(陈智梁和刘宇平,1996),主拆离带和雅鲁藏布江之间的部分,为特提斯喜马拉雅(图1a).STDS及其次级断裂的向北拆离,是南北向伸展的地质响应(Aoya *et al.*,2005;Lee and Whitehouse,2007).STDS的伸展可能开始于～35 Ma(Lee and Whitehouse,2007),具多期活动特征(Yin and Harrison,2000),主要活动期在24～12 Ma(图1b)(Coleman and Hodges,1995;Searle *et al.*,1997;Murphy and Mark Harrison,1999;Yin,2006).南北向正断层系为东西向伸展的地质响应(Kapp and Guynn,2004;Yin and Taylor,2011),主要活动时限可能介于18～4 Ma(图1b)(Yin *et al.*,1999;Blisniuk *et al.*,2001;Williams *et al.*,2001).根据亚东、定结等地南北向正断层明显切割东西向STDS的事实,证明南北向断裂的发育晚于东西向断裂(张进江,2007).在特提斯喜马拉雅地块中部出现一系列由深成岩和变质岩组成的穹窿体(Burchfiel *et al.*,1992;Hauck *et al.*,1998),近东西向展布(图1a),形成于中新世(张进江等,2011;刘文灿等,2004).淡色花岗岩沿穹窿核部侵位,被认为是上地壳变泥质岩部分熔融侵位的产物(Harris and Massey,1994;Guillot and Le

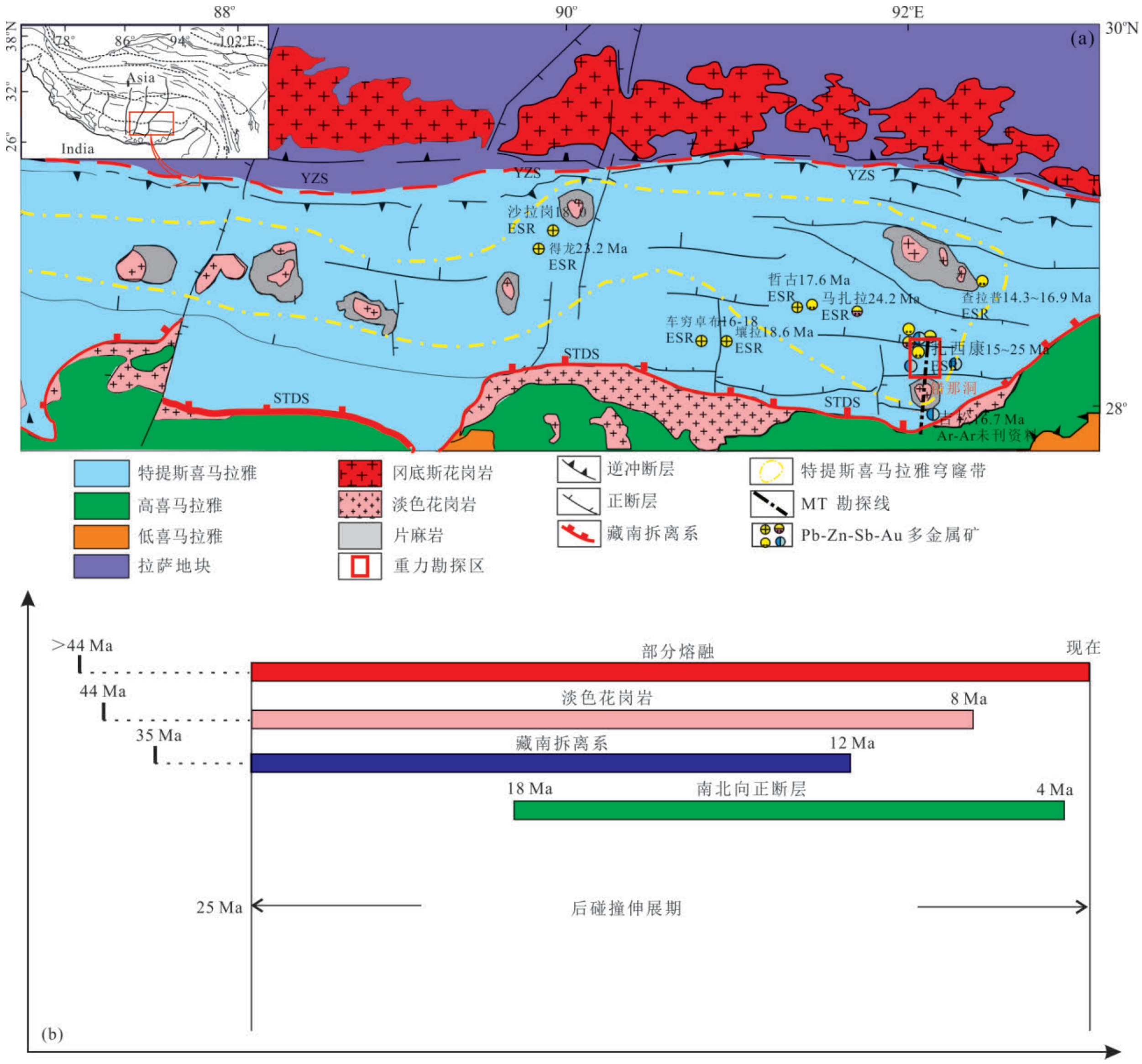


图 1　特提斯喜马拉雅后碰撞阶段构造—热事件时空分布

Fig.1　Temporal and spatial distribution of tectonic-thermal events in the Tethys Himalayan post-collision phase

a.特提斯喜马拉雅地质矿产简图,反映了主要的构造—热事件(图据张进江等,2011 修改;数据源自郑有业等,2007,2014;孟祥金等,2008;张建芳,2010);b.特提斯喜马拉雅后碰撞阶段构造—热事件时间序列示意图(数据源自 Searle et al.,1997;Yin et al.,1999;Blisniuk et al.,2001;Lee and Whitehouse,2007;Aikman et al.,2008;Williams et al.,2001;Liu et al.,2014)

Fort, 1995; Searle *et al.*, 1997; Visonà *et al.*, 2012).25 Ma 以来,特提斯喜马拉雅进入后碰撞伸展期,上述淡色花岗岩沿穹窿带侵位、东西及南北向伸展断裂成为特提斯喜马拉雅独特的构造—热事件(图 1a).

2　数据的采集与处理

2.1　AMT 与 MT 的数据采集与处理

AMT 数据采用加拿大凤凰公司研制的 V5 系列仪器采集,采集 43 点,基准点距 50 m,数据处理时最低频率截取到 1 Hz.MT 数据同样采用加拿大凤凰公司研制的 V5 系列仪器采集完成,基准点距 1 000 m,数据采集最低频率为 0.003 4 Hz,数据处理时最低频率截取到 0.01～0.003 4 Hz.由于测区位于西藏农牧区,无明显干扰源,因而各测点数据质量高.AMT/MT 数据处理与二维反演的相关算法、技术成熟,数据处理包括极化模式判别、静态校正(王家映,1992)等,二维反演解释有快速松弛(RRI)(Smith and Booker, 1991)、OCCAM(Constable *et* *al.*,1987)和共轭梯度反演(Rodi and Mackie,2001)等方法.本次AMT数据反演通过与钻孔工程以及已知地质认识,发现Zongmt软件中的Smoothness constrained反演结果更能表达地电断面的真实情况.因此,AMT与MT数据二维反演采用Smoothness constrained.

2.2 重力的数据采集与处理

重力数据采用LCR-G型重力仪采集完成,共完成了1∶5万比例尺的区域重力(线距500 m,点距400 m)约400 km²以及20 m点距的重力剖面2 km,布格重力异常总精度达±0.120 mGal.重磁反演是根据重力场或磁场的空间分布特征来确定对应的场源体特征.其中物性反演将模型空间离散化为若干个单元,只求解各单元相应的密度(刘天佑,2007),这种方法易于模拟复杂的地质体(侯遵泽等,1998),逐渐成为重磁三维反演的重要方向(姚长利等,2003).利用三维物性反演求解密度的空间分布特征.为了提升反演的结果的可靠性和节省计算成本,对三维物性反演做了相应的改进措施.在提升反演结果的可靠性方面:将快速扫描的互相关系数与深度加权函数同时引入到核矩阵约束中,多个理论模型的试算结果表明这种方法相比仅利用深度加权函数,反演结果对场源的边界刻画更加清晰,本质上属于自约束反演的一种,有助于提高反演结果的可靠性.在节省计算成本方面:我们直接利用迭代正则化方法——LSQR(最小二乘QR分解)法求解线性方程组,具有天然的正则化性质,研究表明它可以提供与Tikhonov正则化几乎相同的效果,在求解过程中只需利用自适应剪枝算法求取L曲线的拐点,并返回拐点处对应迭代次数的求解结果即可,避免了Tikhonov正则化求解需多次搜索正则化因子等而耗费的计算成本.此外,由于LSQR法仅涉及到矩阵与向量的乘积,结合等效几何格架技术可以很方便地将核矩阵分为若干个子矩阵进行存储与运算,大型稠密核矩阵不再被显示地表示出来,节省大量的存储空间.我们利用网格化后的剩余重磁数据进行三维反演,最终的均方误差为0.11 mGal.

2.3 激电中梯面积测量的数据采集与处理

激电测量工作采用中间梯段装置,采集设备为国产重庆奔腾大功率激电仪,发射极距1 500 m,供电电压大于500 V,供电电流>5 A,一次场大于100 mv.获得了约9 km²的1∶1万比例尺的面积性激电数据(线距100 m,点距40 m).其中,激电数据采用视极化率和视电阻率等值线图进行分析.

3 构造—热事件的空间关系及其成矿作用

如图2b所示,MT剖面的布设自南向北从高喜马拉雅进入特提斯喜马拉雅,穿越了后碰撞阶段主要的构造—热事件和典型矿床,包括STDS及其次级断裂、错那洞穹窿(核部淡色花岗岩,外围为片麻岩等变质岩)和扎西康铅锌锑多金属矿,来确立各构造—热事件的空间关系.该剖面共86个测点,长72 km.

由图2可知,特提斯喜马拉雅存在2种构造—热事件空间关系:其一,特提斯喜马拉雅地体深部15 km处存在部分熔融,且部分熔融以淡色花岗岩的形式侵位,形成穹窿构造:主要表现为地下15 km以下的视电阻率呈现南高北低,高阻体的视电阻率范围在$10^{2.5}$~10^{4} Ω·m之间(1~33点;图2a),解释为高喜马拉雅结晶岩系(图2b),低阻体的视电阻率范围介于10^{0}~10^{1} Ω·m(45~86点;图2a),解释为部分熔融体(图2b).该认识与前人通过区域的地球物理探测发现藏南15~20 km深处存在部分熔融的解释一致(Brown *et al.*,1996;Nelson *et al.*,1996;Wei *et al.*,2001).部分熔融,以淡色花岗岩的形式侵位(45~60点之间的高阻体电阻率范围介于$10^{3.5}$~10^{5} Ω·m(图2a),同时呈现明显的低密度特征(图2c)),形成错那洞穹窿构造(Fu *et al.*,2017).60~80点和80~86点的特提斯喜马拉雅的沉积浅变质岩系中高电阻率(图2a)及中高密度特征(图2c),与淡色花岗岩有显著不同.其二,STDS及其次级断裂带以"铲式"断层的形式产出,成为部分熔融体和扎西康铅锌锑多金属矿床之间的沟通渠道:10^{1}~$10^{1.5}$Ω·m的上陡下缓的低阻带(图2a),且呈现低密度的特征(图2c),推断为STDS及其次级断裂带(图2b).STDS不仅作为特提斯喜马拉雅和高喜马拉雅的分界线,具有重要的构造意义(图2b),同时,STDS及其次级断裂在扎西康超大型铅锌锑多金属矿形成过程中具有重要的成矿意义.

如图1b所示,后碰撞期,部分熔融体与STDS是长时间共存的.因此,可能会发生如下成矿作用:后碰撞伸展期,青藏高原的南北向伸展,形成了深达部分熔融的STDS及其次级断裂,造成了局部低压,使得熔体与岩浆热液发生解耦,岩浆热液涌入断裂系统向浅部低压

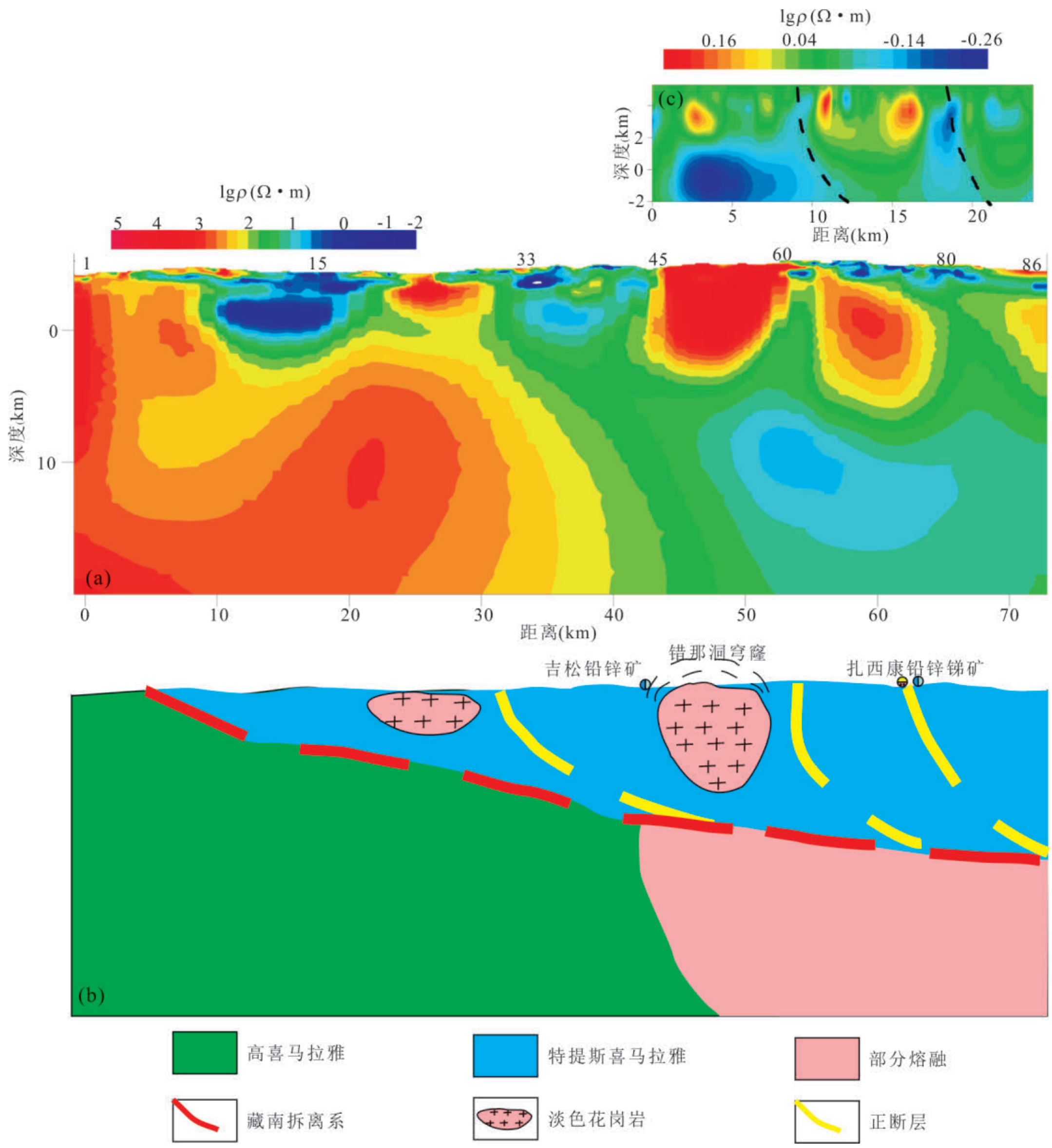


图 2　(a)MT 剖面反演图;(b)MT 剖面解译的构造—热事件空间分布图;(c)重力剖面反演解译图

Fig.2　(a) Inversion of MT section; (b) Tectonic-thermal event spatial distribution map from MT profile interpretation; (c) Inversion and interpretation map of gravity profile

区迁移.同时,断裂孔隙的突然发展与其中流体压力的降低相结合,使得深部的地层建造流体(可能包含变质流体)以及浅部的大气水流入断裂系统.当三种流体混合时(Zhou *et al.*, 2017),使得成矿流体物理化学条件发生变化而造成矿质沉淀.地球化学数据也证明扎西康铅锌锑多金属矿是上述三种流体混合成矿.18 Ma 左右,高原应力发生重大改变,东西向伸展形成南北向伸展断层.这会造成流体渗流路径的重新分布.渗流路径的变化可能引起流体的温压变化,而途径岩性的变化则可引起流体成分的变化,最终在多期次不同的矿物沉淀中体现出来(Cox, 2007).这可能是扎西康铅锌锑金多金属矿两期成矿的主要原因(铅锌成矿期和富锑成矿期).同时,伸展断裂活动的多期次性和部分熔融事件的持续性,保证了整个成矿带的流体通量(图 3).

4　扎西康矿集区综合探测与找矿预测

扎西康铅锌锑金多金属矿是特提斯喜马拉雅铅锌锑金成矿带内唯一的大型—超大型矿床(郑有业等, 2012).主要矿脉为南北向的Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ及北东向的Ⅶ和Ⅷ(图 4a),以及 2015 年探得 Ve(XV)矿

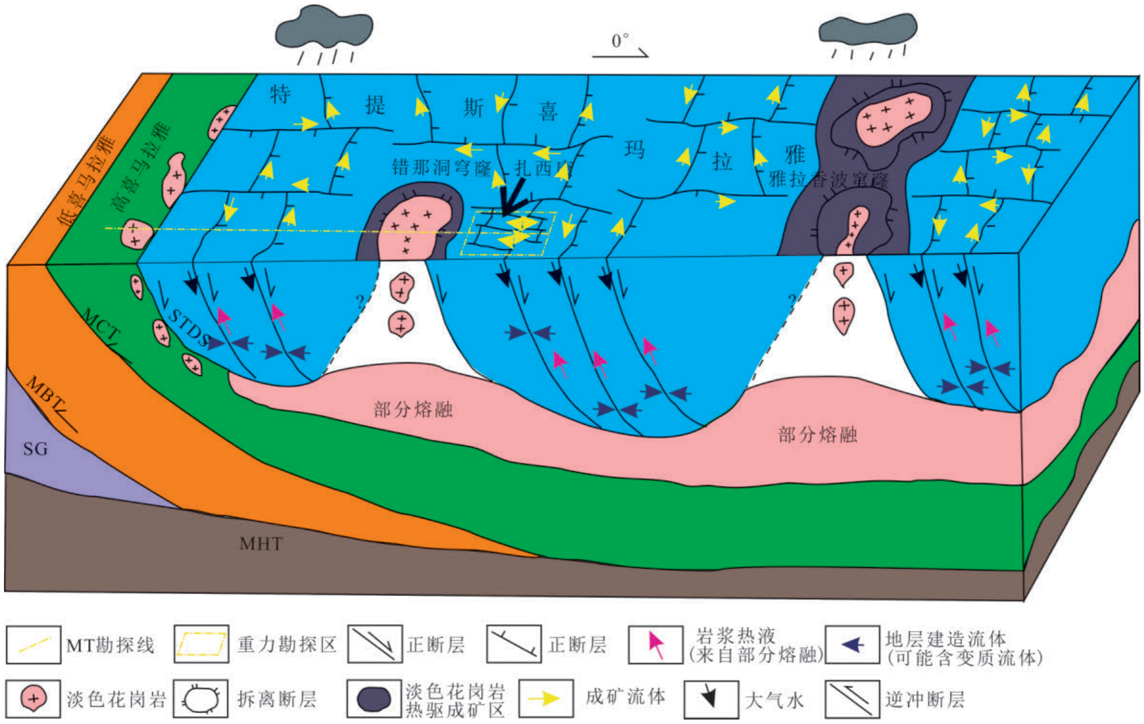


图 3　后碰撞伸展期特提斯喜马拉雅铅锌锑金成矿带构造—热事件成矿作用示意

Fig 3　Schematic diagram of Tethys Himalaya Pb-Zn-Sb-Au metallogenic belt tectonic-thermal event coupling metallogenic model in post-collisional extension stage

体，储量超过 140 万 t，V 号矿体品位最高且储量最大，超过 100 万 t（郑有业等，2012）. 矿体呈脉状（倾向西，倾角 45°～70°）（图 4b）赋存于侏罗系日当组断裂构造带内. 含矿热液来源主要为岩浆热液、地层建造流体和大气水（孟祥金等，2008），三者混合造成了矿质沉淀（李应栩等，2015）. 成矿时间为青藏高原后碰撞伸展成矿期（梁维等，2015；Sun *et al.*，2018），且主要分为两期，以铅锌为主的成矿期和富锑成矿期.

由图 2b 可知，扎西康铅锌锑多金属矿位于深达部分熔融的断裂带上. 区域性的主干断裂是深部流体向上迁移至矿质沉淀空间的主要通道（McCaig *et al.*，1990；Laigle *et al.*，2000）. 对于热液脉型矿床，一个不可忽视的现象是矿体更常见于较窄的小位移结构（Eisenlohr *et al.*，1989；Cox，1995；Micklethwaite and Cox，2004）. 由此推知，含矿热液是通过分层级的断裂网络从地壳深部流体源向浅部排泄区迁移（Cox，2007）. 因此，根据上述成矿模式，通过多尺度的综合地球物理方法对不同层级的断裂系统开展研究，逐步缩小勘探范围，最终定位矿体.

4.1　扎西康整装勘查区断裂系统的地球物理响应

通过约 400 km^2 的 1∶5 万高精度重力测量（图 6a，相对位置见图 1a）和近南北向 MT 剖面（点距 500 m，约 13 km）及近东西向 MT 剖面（约 17 km）（图 6b，相对位置见图 6a），对扎西康整装勘查区导矿断裂系统开展研究.

区域岩性特征：研究区属于特提斯喜马拉雅地层分区，中生代地层分布最广，以浅海—深海相砂岩、泥岩及页岩为主，伴有陆相碎屑沉积岩，泥页岩经区域变质作用后成为板岩. 火成岩主要包括玄武岩、辉绿岩、辉长岩等（Zhu *et al.*，2009；Liu *et al.*，2015）以及淡色花岗岩（Searle *et al.*，1997；Yin and Harrison，2000）.

岩石密度特征：对研究区主要岩性的密度进行了测量，共 472 块（数据见附表 1），样本平均密度 2.703 7. 对于区域内的主要岩性，如板岩、灰岩、花岗岩采取了正态分布曲线，求取期望值和标准差. 板岩样品数据，服从正态分布，而花岗岩类样品数据呈现双峰特征（图 5），因此，对花岗岩类样品分两类做密度统计. 出露较少的岩性，如辉绿岩、凝灰岩等，则采用几何平均法，求取平均值. 由图 5 可知，花岗岩类在勘查区呈现低密度特征.

通过 1∶5 万的高精度重力勘探，发现扎西康矿区与则当、柯月、索月矿区位于不同的低密度体“网格”内（图 6a）. 由上述物性分析，区内的花岗岩类显

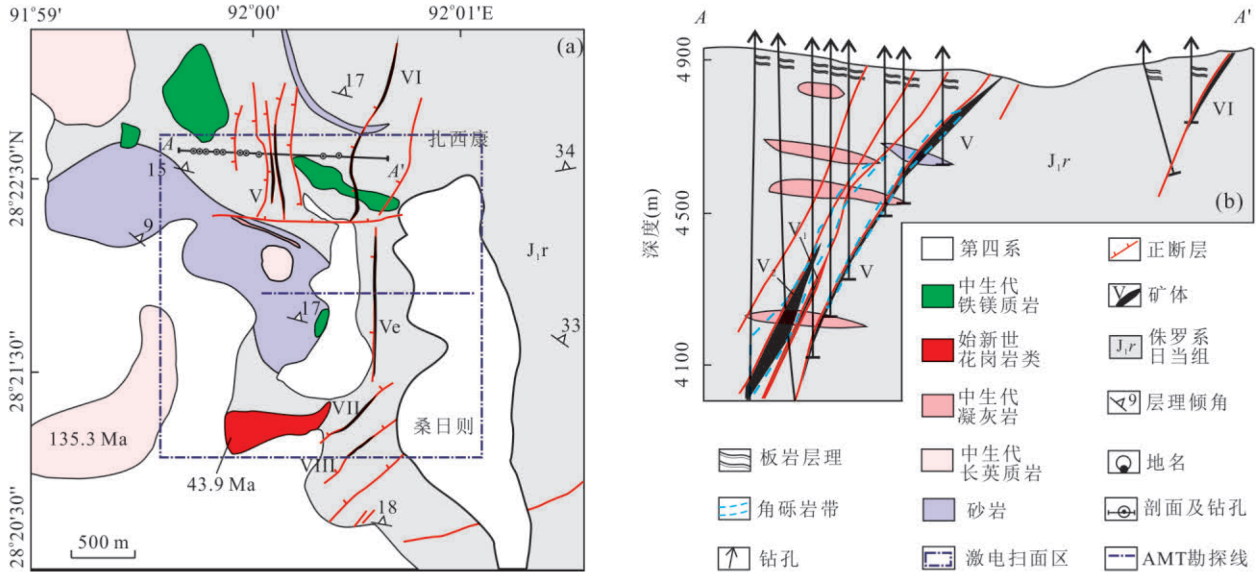


图 4　(a)扎西康矿集区地质简图;(b)铅锌矿体典型剖面

Fig.4　(a) Geology map of Zhaxikang deposit,(b) Pb-Zn sectional view of body

据 Zhou *et al*.(2017)修改

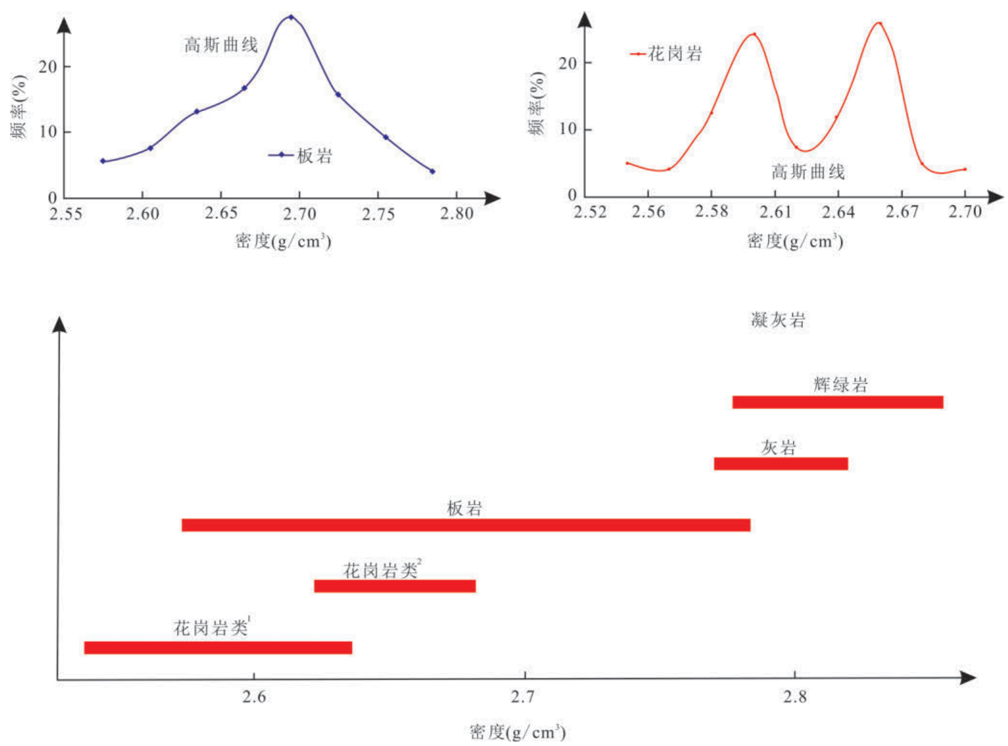
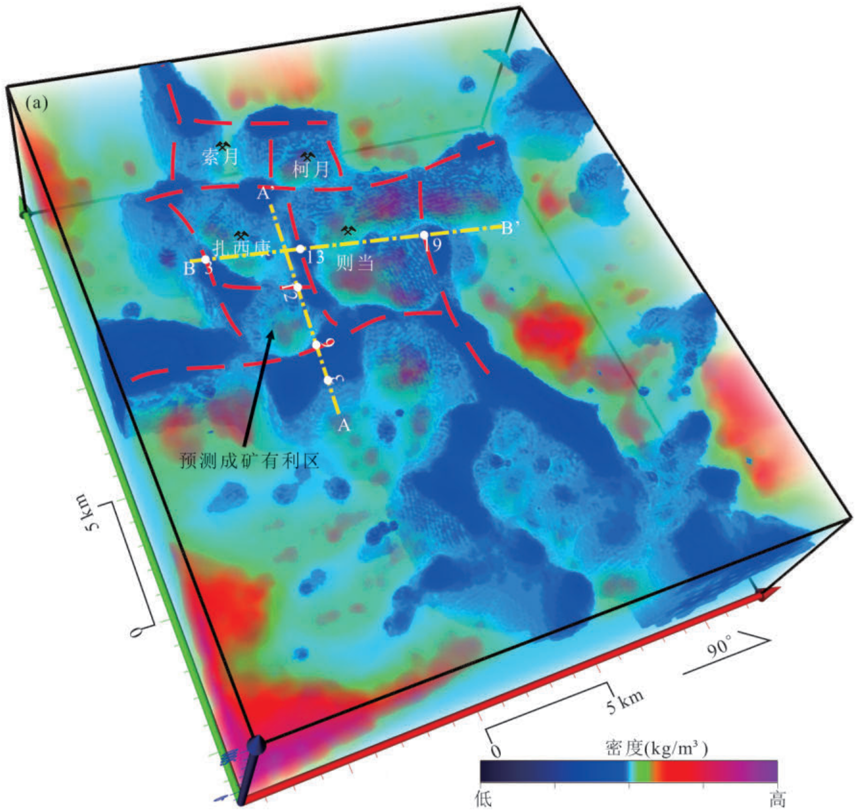


图 5　扎西康整装勘查区岩石密度统计结果

Fig.5　Statistical results of rock density in Zhaxikang area

示较明显的低密度特征.同时,后碰撞伸展期东西、南北向的伸展作用,形成了东西南北纵横交错的断裂系统(张进江,2007),其形成的拉伸空间也会造成低密度的地球物理响应.因此,该网格状的低密度体可能是花岗岩类的地球物理响应,也可能是断裂构造的地球物理响应.为此,通过一条东西向MT剖面(共21个点约13 km,在低密度体处加密测点,点距约500 m,$B-B'$),联合南北向MT剖面(共29点,约17 km,在低密度体处加密测点,点距约500 m,$A-A'$),对浅部信息(频率>0.1 Hz)进行反演,



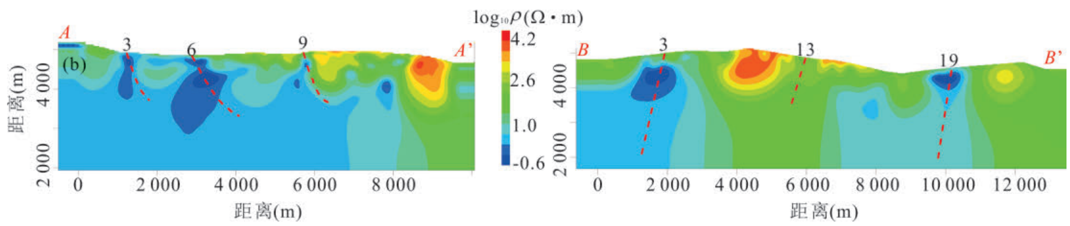


图6　(a)扎西康整装勘查区1:5万高精度重力测量密度三维反演解译图;(b)MT剖面浅部信息反演解译图

Fig.6　(a) 3-D inversion interpretation diagram of 1:50 000 high-precision gravity measurement in Zhaxikang integrated exploration area;(b) shallow information inversion interpretation diagram of MT section

从电性方面来区别低密度体是花岗岩类还是断裂带.1:5万重力三维反演中的低密度体(图6a),在MT剖面中呈现低视电阻率响应(图6b).因此,低密度低电阻率的特征应为断裂带的地球物理响应.网状的断裂系统的重要成矿意义在于,两组近似垂直的构造,使其从不同方向连接不同等级的渗流通道(陈昌彦等,1996),这就保证了含矿热液通过量.同时两个垂直方向的应力变化,使得"网格"内部较易形成相互连通的次级断裂系统,使含矿热液就位.

4.2　扎西康矿集区断裂系统的地球物理响应

通过点距40 m,约9 km²的激电中梯面积测量(图8a、8b,位置见图4a)和点距50 m,约2.3 km的AMT剖面(图8c,位置见图8a、8b)及点距20 m的重力剖面,对矿集区含矿断裂系统开展研究.

赋矿围岩:西藏扎西康铅锌锑多金属矿,矿体呈脉状(倾向西,倾角45°~70°)赋存于侏罗系日当组的断裂构造带内(图4b).日当组为一套互层状的深灰色－灰黑色页岩、钙质页岩,含泥灰岩、砂岩、凝灰岩,夹泥质灰岩和燧石团块,总厚度大于900 m,属深水相沉积,经低级变质后形成了含碳钙质板岩(梁维,2014).

含碳质岩石电性特征:通过对扎西康ZK4006钻孔岩心的电性测试发现,大部分含碳钙质板岩呈现低阻高极化的电性特征(图7)与前人电性测试结果相近(焦彦杰等,2015,2017).但是,赋存矿体的含碳钙质板岩呈现高阻低极化的电性特征(图7).同

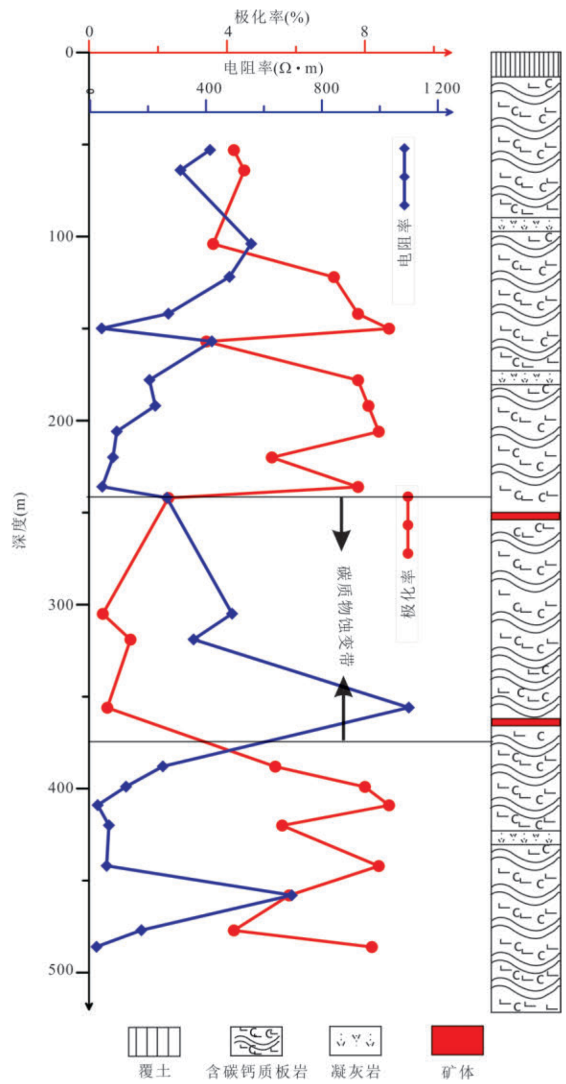


图7　扎西康ZK4006钻孔岩心电阻率与极化率变化曲线

Fig.7　Resistivity and polarizability curve of ZK4006 drill in Zhaxikang

时,如图8a所示,激电中梯面积测量中矿区呈现高的极化率背景介于9%～20%,而矿体位于1%～5%低极化率条带中,极化率高值区的钻孔不含矿.在岩性无明显变化的情况下(含碳钙质板岩夹少量凝灰岩)(图7),这是含碳质岩石被含矿热液蚀变后造成的电性变化所致.含碳质岩石埋深、变质的“石墨化”过程,促进了杂原子的排出,增加了其导电性;而含碳质岩石经受热液蚀变的“逆石墨化”过程,杂原子的插入大大降低了碳质物的导电性.蚀变带与未被蚀变岩石中的碳质物有明显的电性差异.通过对69件样品的测试分析,得出岩石中的有机碳平均含量高达2%.而0.7%的有机碳含量足以使变质岩的电阻率降低一个数量级.因此,高阻低极化率条带是含矿热液流经的标志,可以作为矿体勘探的目标.同时,含矿断裂在点距20 m的重力剖面上显示低密度特征,这应是后碰撞伸展环境下形成的拉伸空间的地球物理响应(图8d).

因此,运用激电中梯面积测量把含矿断裂定位在200～300 m的低极化率高电阻率条带内(图8a、8b).含矿断裂的地下产状则需通过AMT和重力剖面来进行定位,含矿断裂位呈现高视电阻率和低密度的特征(图8c、8d),且宽度200～300 m的高视电阻率区域与低视极化率条带位置吻合(图8c).低密度特征应为后碰撞期形成的拉伸空间的地球物理响应.

综上可知,72 km的MT剖面确定了扎西康矿集区深部构造－热事件的空间关系,推测了可能的构造－热耦合成矿作用;通过1∶5万高精度重力和MT剖面,确定了扎西康区域上的导矿断裂系统,呈网状的低密度低电阻率特征,从不同方向连接不同等级的渗流通道,缩小了找矿靶区;通过含碳钙质板岩中的激电中梯面积测量、音频大地电磁测深及点距20 m的重力剖面圈定了含矿断裂.

4.3　矿床预测

通过3种尺度综合的地球物理勘探,做出3种矿床预测:(1)MT剖面33～45点的“铲式”断裂带沟通了部分熔融,为铅锌锑金矿床的成矿有利区(图2a);(2)1∶5万高精度重力扫面区内,扎西康矿集区的南侧相邻的“网状”断裂(图6a),起到了沟通不同等级断裂系统的作用,有利于成矿流体的迁移就位,为铅锌锑金矿床的成矿有利区;且扎西康东边的则当矿区位于更大“网状”断裂内,拥有更大的成矿潜力,后期应加大矿床勘探力度;(3)根据同一渗流单元(“网状”断裂)内,含矿热液流经相互连通断裂的原则,推断Ve矿体东侧约600 m处的低极化率(图8a)高电阻率(图8c)及低密度区(图8d),存在VI矿体的延伸VIe矿体.

5　结论

(1)通过穿越错那洞穹窿、藏南拆离系(STDS)及扎西康矿集区的南北向MT剖面(长72 km,基准点距1 km),初步建立了扎西康深部构造－热事件的空间关系,并结合区域构造－热事件的时间关系,提出了可能的构造－热耦合成矿作用,为后续扎西康的地球物理勘探提供基础.(2)通过1∶5万的区域重力和MT浅部信息的联合解译,发现扎西康、

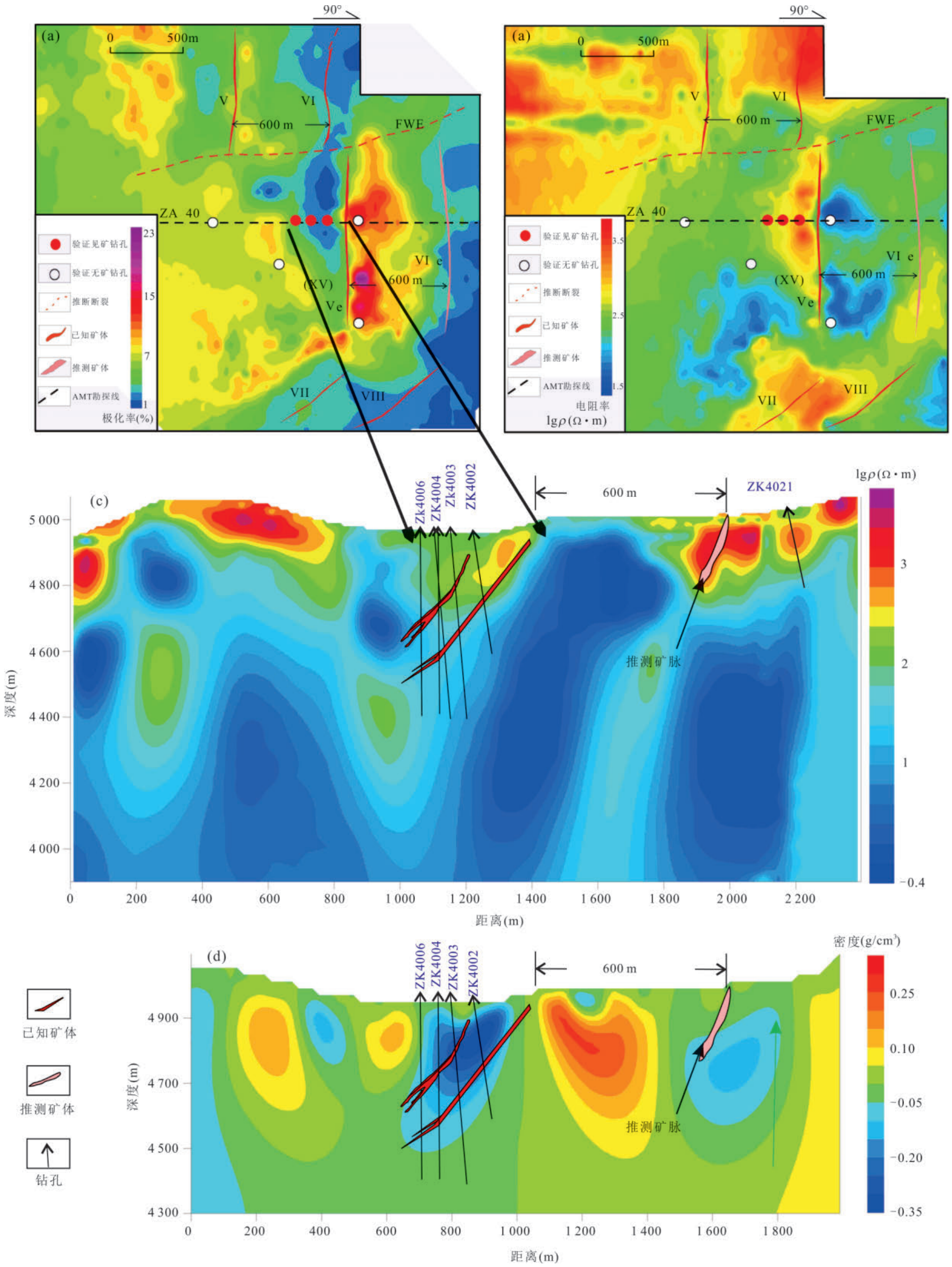


图 8 (a)激电中梯面积测量视极化率图;(b)激电中梯面积测量视电阻率图;(c)AMT 反演解译图;(d)重力剖面反演解译图

Fig.8 (a) Polarizability map of IP measurement, (b) resistivity map of IP measurement, (c) inversion and interpretation map of AMT, (d) inversion and interpretation map of gravity profile

柯月、索月等铅锌锑金矿床分布于低密度低电阻率的"网状"构造内,为形成后碰撞伸展期断裂系统的地球物理响应,且是含矿热液从地壳深部运移至矿集区的重要通道.(3)通过激电中梯面积测量、AMT

及重力剖面的联合解译,得出扎西康含矿断裂表现为高阻低极化低密度特征,解释为含矿热液蚀变碳质物和后碰撞阶段形成的拉伸空间的地球物理响应.(4)根据3种尺度的综合地球物理方法,给出了3种尺度的矿床预测.

致谢:野外工作得到了扎西康矿山王维、王益庆等工程师的大力协助,梁维等对文章的写作提出了建设性意见,在此表示衷心感谢.

附表见地球科学官网(www.earth－science.net).

References

Aikman, A.B., Harrison, T.M., Lin, D., 2008. Evidence for Early (>44 Ma) Himalayan Crustal Thickening, Tethyan Himalaya, Southeastern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 274(1－2): 14－23. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.06.038

Aoya, M., Wallis, S.R., Terada, K., et al., 2005. North-South Extension in the Tibetan Crust Triggered by Granite Emplacement. *Geology*, 33(11): 853－856. https://doi.org/10.1130/g21806.1

Beck, R.A., Burbank, D.W., Sercombe, W.J., et al., 1995. Stratigraphic Evidence for an Early Collision between Northwest India and Asia. *Nature*, 373:55－58.

Blisniuk, P.M., Hacker, B.R., Glodny, J., et al., 2001. Normal Faulting in Central Tibet since at Least 13.5 Ma Ago. *Nature*, 412(6847):628－632.

Brown, L.D., Zhao, W., Nelson, K.D., et al., 1996. Bright Spots, Structure, and Magmatism in Southern Tibet from INDEPTH Seismic Reflection Profiling. *Science*, 274(5293):1688－1690.

Burchfiel, B.C., Chen, Z.L., Hodges, K.V., et al., 1992. The South Tibetan Detachment System, Himalayan Orogen: Extension Contemporaneous with and Parallel to Shortening in a Collisional Mountain Belt. *The Geological Society of America*, 269:1－41.

Burg, J.P., Guiraud, M., Chen, G.M., et al., 1984. Himalayan Metamorphism and Deformations in the North Himalayan Belt (Southern Tibet, China). *Earth and Planetary Science Letters*, 69(2):391－400.

Chen, C.Y., Wang, S.J., Wang, G.R., et al., 1996. Cenozoic Extensional Tectonic System Control of the Underground Water in Ordovician Limestone in East Weibei, Shaanxi Province. *Journal of Geomechanics*, 2(4):21－30 (in Chinese with English abstract).

Chen, Z.L., Liu, Y.P., 1996. The South Tibetan Detachment System. *Tethyan Geology*, (20):32－51(in Chinese with English abstract).

Coleman, M., Hodges, K., 1995. Evidence for Tibetan Plateau Uplift before 14 Ma Ago from a New Minimum Age for East-West Extension. *Nature*, 374:49－52. https://doi.org/10.1038/374049a0

Constable, S.C., Parker, R.L., Constable, C.G., 1987. Occam's Inversion: A Practical Algorithm for Generating Smooth Models from Electromagnetic Sounding Data. *Geophysics*, 52(3):289－300. https://doi.org/10.1190/1.1442303

Cox, S.F., 1995. Faulting Processes at High Fluid Pressures: An Example of Fault Valve Behavior from the Wattle Gully Fault, Victoria, Australia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B7): 12841－12859. https://doi.org/10.1029/95jb00915

Cox, S.F., 2007. Structural and Isotopic Constraints on Fluid Flow Regimes and Fluid Pathways during Upper Crustal Deformation: An Example from the Taemas Area of the Lachlan Orogen, SE Australia. *Journal of Geophysical Research*, 112(B8):B08208.

Eisenlohr, B.N., Groves, D., Partington, G.A., 1989. Crustal-Scale Shear Zones and Their Significance to Archaean-Gold Mineralization in Western Australia. *Mineralium Deposita*, 24(1):1－8.

Fu, J.G., Li, G.M., Wang, G.H., et al., 2017. First Field Identification of the Cuonadong Dome in Southern Tibet: Implications for EW Extension of the North Himalayan Gneiss Dome. *International Journal of Earth Sciences*, 106(5): 1581－1596. https://doi.org/10.1007/s00531－016－1368－2

Guillot, S., Le Fort, P., 1995. Geochemical Constraints on the Bimodal Origin of High Himalayan Leucogranites. *Lithos*, 35(3－4): 221－234. https://doi.org/10.1016/0024-4937(94)00052－4

Harris, N., Massey, J., 1994. Decompression and Anatexis of Himalayan Metapelites. *Tectonics*, 13(6): 1537－1546. https://doi.org/10.1029/94tc01611

Hauck, M.L., Nelson, K.D., Brown, L.D., et al., 1998. Crustal Structure of the Himalayan Orogen at ～90° East Longitude from Project INDEPTH Deep Reflection Profiles. *Tectonics*, 17(4): 481－500. https://doi.org/10.1029/98tc01314

Hodges, K.V., 2000. Tectonics of the Himalaya and Southern Tibet from Two Perspectives. *Geological Society of America Bulletin*, 112(3):324－350.

Hodges, K.V., Parrish, R.R., Housh, T.B., et al., 1992. Simultaneous Miocene Extension and Shortening in the Himalayan Orogen. *Science*, 258(5087): 1466－1470. https://doi.org/10.1126/science.258.5087.1466

Hou, Z.Q., 2010. Metallogenesis of Continental Collision. *Acta*

Geologica Sinica, 84(1): 30－58(in Chinese with English abstract).

Hou, Z.Q., Qu, X.M., Yang, Z.S., et al., 2006c. Metallogenesis in Tibetan Collisional Orogenic Belt: Ⅲ. Mineralization in Post-Collisional Extension Setting. *Mineral Deposits*, 25(6): 629－651(in Chinese with English abstract).

Hou, Z.Q., Pan, G.T., Wang, A.J., et al., 2006b. Metallogenesis in Tibetan Collisional Orogenic Belt: Ⅱ. Mineralization in Late-Collisional Transformation Setting. *Mineral Deposits*, 25(5): 521－543(in Chinese with English abstract).

Hou, Z.Q., Yang, Z.S., Xu, W.Y., et al., 2006a. Metallogenesis in Tibetan Collisional Orogenic Belt: Ⅰ. Mineralizationin Main Collisional Orogenic Setting. *Mineral Deposits*, 25(4): 337－358(in Chinese with English abstract).

Hou, Z.Z., Yang, W.C., Liu, J.Q., 1998. Multiscale Inversion of the Density Contrast within the Crust of China. *Chinese Journal of Geophysics*, 41(5): 642－651(in Chinese with English abstract).

Jiao, Y.J., Liang, S.X., Guo, J., et al., 2015. Comparative Research on the Combinational Test of Geophysical Methods in the Zhaxikang Lead-Zinc Ore Concentration Area, Tibet. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 39(2): 245－252(in Chinese with English abstract).

Jiao, Y.J., Liang, S.X., Guo, J., 2017. Research on the Prediction of Tibet Sangrize Black Rock Series Positioning Structure Hydrothermal Type Pb, Zn Ore. *Progress in Geophysics*, 32(2): 634－639(in Chinese with English abstract).

Kapp, P., Guynn, J.H., 2004. Indian Punch Rifts Tibet. *Geology*, 32(11): 993－996. https://doi.org/10.1130/g20689.1

Laigle, M., Hirn, A., Sachpazi, M., et al., 2000. North Aegean Crustal Deformation: An Active Fault Imaged to 10 km Depth by Reflection Seismic Data. *Geology*, 28(1): 71－74.

Lee, J., Whitehouse, M.J., 2007. Onset of Mid-Crustal Extensional Flow in Southern Tibet: Evidence from U/Pb Zircon Ages. *Geology*, 35(1): 45－48. https://doi.org/10.1130/g22842a.1

Li, Y.X., Li, G.M., Dong, S.L., et al., 2015. Preliminary Study on Fluid Evolution in the Ore Forming Process of the Zhaxikang Polymetallic Deposit, Tibet, China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(3): 571－582.(in Chinese with English abstract).

Liang, W., 2014. Metallogenesis of Au-Sb-Pb-Zn mineralization in Tethys Himalaya Belt, South Tibet, China(Dissertation). China University of Geosciences, Beijing(in Chinese with English abstract).

Liang, W., Yang, Z, S., Zheng, Y.C., 2015. The Zhaxikang Pb-Zn Polymetallic Deposit: Ar-Ar Age of Sericite and Its Metallogenic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 89(3): 560－568(in Chinese with English abstract).

Liu, T.Y., Yang, Y.S., Li, Y.Y., et al., 2007. The Order-Depression Solution for Large-Scale Integral Equation and Its Application in the Reduction of Gravity Data to a Horizontal Plane. *Chinese Journal of Geophysics*, 50(1): 290－296(in Chinese with English abstract).

Liu, W.C., Wang, Y., Zhang, X.X., et al., 2004. The Rock Types and Isotope Dating of the Kangmar Gneissic Dome in Southern Tibet. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 491－501 (in Chinese with English abstract).

Liu, Z., Zhou, Q., Lai, Y., et al., 2015. Petrogenesis of the Early Cretaceous Laguila Bimodal Intrusive Rocks from the Tethyan Himalaya: Implications for the Break-up of Eastern Gondwana. *Lithos*, 236－237: 190－202. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.09.006

Liu, Z.C., Wu, F.Y., Ji, W.Q., et al., 2014. Petrogenesis of the Ramba Leucogranite in the Tethyan Himalaya and Constraints on the Channel Flow Model. *Lithos*, 208－209: 118－136. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.08.022

McCaig, A.M., Wickham, S.M., Taylor, H.P., 1990. Deep Fluid Circulation in Alpine Shear Zones, Pyrenees, France: Field and Oxygen Isotope Studies. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 106(1): 41－60. https://doi.org/10.1007/bf00306407

Meng, X.J., Yang, Z.S., Qi, X.X., et al., 2008. Silicon-Oxygen-Hydrogen Isotopic Compositions of Zaxikang Antimony Polymetallic Deposit in Southern Tibet and Its Responses to the Ore-Controlling Structure. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1649－1655(in Chinese with English abstract).

Micklethwaite, S., Cox, S.F., 2004. Fault-Segment Rupture, Aftershock-Zone Fluid Flow, and Mineralization. *Geology*, 32(9): 813－816. https://doi.org/10.1130/g20559.1

Murphy, M.A., Mark Harrison, T., 1999. Relationship between Leucogranites and the Qomolangma Detachment in the Rongbuk Valley, South Tibet. *Geology*, 27(9): 831－834.

Nelson, K.D., Zhao, W., Brown, L.D., et al., 1996. Partially Molten Middle Crust beneath Southern Tibet: Synthesis of Project INDEPTH Results. *Science*, 274(5293): 1684－1688. https://doi.org/10.1126/science.274.5293.1684

Rodi, W.L., MacKie, R.L., 2001. Nonlinear Conjugate Gradients Algorithm for 2-D Magnetotelluric Inversion. *Geophysics*, 66(1): 174－187.

Searle, M.P., Khan, M.A., Fraser, J.E., et al., 1999. The Tectonic Evolution of the Kohistan-Karakoram Collision Belt along the Karakoram Highway Transect, North Pakistan. *Tectonics*, 18(6): 929－949. https://doi. org / 10.1029/1999tc900042

Searle, M.P., Parrish, R.R., Hodges, K.V., et al., 1997. Shisha Pangma Leucogranite, South Tibetan Himalaya: Field Relations, Geochemistry, Age, Origin, and Emplacement. *The Journal of Geology*, 105(3): 295－318. https://doi. org/10.1086/515924

Smith, J.T., Booker, J.R., 1991. Rapid Inversion of Two- and Three-Dimensional Magnetotelluric Data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B3): 3905－3922.

Sun, X., Zheng, Y.Y., Pirajno, F., et al., 2018. Geology, S-Pb Isotopes, and $^{40}Ar/^{39}Ar$ Geochronology of the Zhaxikang Sb-Pb-Zn-Ag Deposit in Southern Tibet: Implications for Multiple Mineralization Events at Zhaxikang. *Mineralium Deposita*, 53(3): 435－458. https://doi.org/10.1007/s00126-017-0752-6

Visonà, D., Carosi, R., Montomoli, C., et al., 2012. Miocene Andalusite Leucogranite in Central-East Himalaya (Everest-Masang Kang Area): Low-Pressure Melting during Heating. *Lithos*, 144－145: 194－208. https://doi. org / 10.1016/j.lithos.2012.04.012

Wang, J. Y., 1992. Problem about Static Correction in Magnetotellurics. *Geological Science and Technology Information*, 11(1): 69－76 (in Chinese with English abstract).

Wei, W.B., Unsworth, M., Jones, A., et al., 2001. Detection of Widespread Fluids in the Tibetan Crust by Magnetotelluric Studies. *Science*, 292(5517): 716－719. https://doi. org/10.1126/science.1010580

Williams, H., Turner, S., Kelley, S., et al., 2001. Age and Composition of Dikes in Southern Tibet: New Constraints on the Timing of East-West Extension and Its Relationship to Postcollisional Volcanism. *Geology*, 29 (4): 339－342.

Xu, Z.Q., Yang, J.S., Jiang, M., et al., 1999. Continental Subduction and Uplifting of the Orogenic Belts at the Margin of the Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers*, 6(3): 139－151 (in Chinese with English abstract).

Yao, C.L., Hao, T.Y., Guan, Z.N., et al., 2003. High-Speed Computation and Efficient Storage in 3-D Gravity and Magnetic Inversion Based on Genetic Algorithms. *Chinese Journal of Geophysics*, 46(2): 252－258 (in Chinese with English abstract).

Yin, A., 2001. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen in the Context of Phanerozoic Continental Growth of Asia. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(3): 193－230 (in Chinese with English abstract).

Yin, A., 2006. Cenozoic Tectonic Evolution of the Himalayan Orogen as Constrained by Along-Strike Variation of Structural Geometry, Exhumation History, and Foreland Sedimentation. *Earth-Science Reviews*, 76(1－2): 1－131. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.05.004

Yin, A., Harrison, T.M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211－280. https://doi. org / 10.1146/annurev.earth.28.1.211

Yin, A., Kapp, P.A., Murphy, M.A., et al., 1999. Significant Late Neogene East-West Extension in Northern Tibet. *Geology*, 27(9): 787－790.

Yin, A., Taylor, M.H., 2011. Mechanics of V-Shaped Conjugate Strike-Slip Faults and the Corresponding Continuum Mode of Continental Deformation. *Geological Society of America Bulletin*, 123(9－10): 1798－1821. https://doi.org/10.1130/b30159.1

Zhang, J.F., 2010. The Genesis Study of Zhaxikang Lead Zinc Antimony Silver Deposit, North Himalayan (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).

Zhang, J.J., 2007. A Review on the Extensional Structures in the Northern Himalaya and Southern Tibet. *Geological Bulletin of China*, 26(6): 639－649 (in Chinese with English abstract).

Zhang, J.J., Yang, X.Y., Qi, G.W., et al., 2011. Geochronology of the Malashan Dome and Its Application in Formation of the Southern Tibet Detachment System (STDS) and Northern Himalayan Gneiss Domes (NHGD). *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3535－3544 (in Chinese with English abstract).

Zheng, Y.Y., Duo, J., Ma, G.T., et al., 2007. Mineralization Characteristics, Discovery and Age Restriction of Chalapu Hardrock Gold Deposit, Southern Tibet. *Earth Science*, 32(2): 185－193 (in Chinese with English abstract).

Zheng, Y.Y., Liu, M.Y., Sun, X., et al., 2012. Type, Discovery Process and Significance of Zhaxikang Antimony Polymetallic Ore Deposit, Tibet. *Earth Science*, 37(5): 1003－1014 (in Chinese with English abstract).

Zheng, Y.Y., Sun, X., Tian, L.M., et al., 2014. Mineralization, Deposit Type and Metallogenic Age of the Gold Antimony Polymetallic Belt in the Eastern Part of North Himalayan. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(1): 108－118 (in Chinese with English abstract).

Zhou, Q., Li, W.C., Qing, C.S., et al., 2017. Origin and Tectonic Implications of the Zhaxikang Pb-Zn-Sb-Ag Deposit in Northern Himalaya: Evidence from Structures, Re-Os-Pb-S Isotopes, and Fluid Inclusions. *Mineralium De-*

posita,2:1－16.

Zhu,D.C.,Chung,S.L.,Mo,X.X.,et al.,2009.The 132 Ma Comei-Bunbury Large Igneous Province:Remnants Identified in Present-Day Southeastern Tibet and Southwestern Australia.*Geology*,37(7):583－586.https://doi.org/10.1130/g30001a.1

附中文参考文献

陈昌彦,王思敬,王贵荣,等,1996.陕西渭北东部区新生代伸展构造网络系统对奥灰水的控制作用.地质力学学报,2(4):21－30.

陈智梁,刘宇平,1996.藏南拆离系.特提斯地质,(20):32－51.

侯增谦,2010.大陆碰撞成矿论.地质学报,84(1):30－58.

侯增谦,杨竹森,徐文艺,等,2006a.青藏高原碰撞造山带:Ⅰ.主碰撞造山成矿作用.矿床地质,25(4):337－358.

侯增谦,潘桂棠,王安建,等,2006b.青藏高原碰撞造山带:Ⅱ.晚碰撞转换成矿作用.矿床地质,25(5):521－543.

侯增谦,曲晓明,杨竹森,等,2006c.青藏高原碰撞造山带:Ⅲ.后碰撞伸展成矿作用.矿床地质,25(6):629－651.

侯遵泽,杨文采,刘家琦,1998.中国大陆地壳密度差异多尺度反演.地球物理学报,41(5):642－651.

焦彦杰,梁生贤,郭镜,2017.西藏桑日则黑色岩系构造热液型铅锌矿定位预测研究.地球物理学进展,32(2):634－639.

焦彦杰,梁生贤,郭镜,等,2015.西藏扎西康铅锌矿集区的物探方法组合试验.物探与化探,39(2):245－252.

李应栩,李光明,董随亮,等,2015.西藏扎西康多金属矿床成矿过程中的流体性质演化初探.矿物岩石地球化学通报,34(3):571－582.

梁维,2014.特提斯喜马拉雅金锑铅锌成矿带成矿作用研究(博士学位论文).北京:中国地质大学.

梁维,杨竹森,郑远川,2015.藏南扎西康铅锌多金属矿绢云母Ar-Ar年龄及其成矿意义.地质学报,89(3):560－568.

刘天佑,杨宇山,李媛媛,等,2007.大型积分方程降阶解法与重力资料曲面延拓.地球物理学报,50(1):290－296.

刘文灿,王瑜,张祥信,等,2004.西藏南部康马岩体岩石类型及其同位素测年.地学前缘,11(4):491－501.

孟祥金,杨竹森,戚学祥,等,2008.藏南扎西康锑多金属矿硅－氧－氢同位素组成及其对成矿构造控制的响应.岩石学报,24(7):1649－1655.

王家映,1992.关于大地电磁的静校正问题.地质科技情报,11(1):69－76.

许志琴,杨经绥,姜枚,等,1999.大陆俯冲作用及青藏高原周缘造山带的崛起.地学前缘,6(3):139－151.

姚长利,郝天珧,管志宁,等,2003.重磁遗传算法三维反演中高速计算及有效存储方法技术.地球物理学报,46(2):252－258.

尹安,2001.喜马拉雅－青藏高原造山带地质演化—显生宙亚洲大陆生长.地球学报,22(3):193－230.

张建芳,2010.北喜马拉雅扎西康铅锌锑银矿床成因研究(硕士学位论文).武汉:中国地质大学.

张进江,2007.北喜马拉雅及藏南伸展构造综述.地质通报,26(6):639－649.

张进江,杨雄英,戚国伟,等,2011.马拉山穹窿的活动时限及其在藏南拆离系:北喜马拉雅片麻岩穹窿形成机制的应用.岩石学报,27(12):3535－3544.

郑有业,多吉,马国桃,等,2007.藏南查拉普岩金矿床特征、发现及时代约束.地球科学,32(2):185－193.

郑有业,刘敏院,孙祥,等,2012.西藏扎西康锑多金属矿床类型、发现过程及意义.地球科学,37(5):1003－1014.

郑有业,孙祥,田立明,等,2014.北喜马拉雅东段金锑多金属成矿作用、矿床类型与成矿时代.大地构造与成矿学,38(1):108－118.